

Стратегия безопасности больших сетей

Я.А. Мостовой^а, В.А. Бердников^а

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

Аннотация

Рассматривается оптимальное двухфазное планирование защищённых маршрутов в больших вычислительных сетях. Неопределённость в будущих потребностях закрывается обширным статистическим моделированием, в результате которого определены статистические зависимости и феномены, позволившие оптимизировать операции планирования. Использован аппарат программируемой перколяции на случайных матрицах защищенных путей. Рассмотрена устойчивость планируемых защищенных маршрутов к отказам отдельных защищённых путей.

Ключевые слова: информационная безопасность; большие сети; перколяция; программируемая перколяция; двухфазные операции

1. Введение

Большие (сложные) сети характеризуются большим количеством узлов и путей между ними и неоднородной топологией. Существует несколько актуальных задач исследования таких сетей, например, анализ размеров и количества кластеров объектов разного типа, образующихся в сетях, анализ путей между узлами и кластерами, анализ узлов, изъятие которых ведёт к распаду сети на несвязанные части и т.п.

Задачей стратегии безопасности, как не детализированного плана деятельности, охватывающего длительный период времени и направленного на достижение безопасности больших сетей, является эффективное использование ограниченных ресурсов.

В этом случае поэтапное гибкое планирование решения задачи безопасности по критерию минимума суммарных затрат позволяет достичь поставленных целей.

В работах [10, 14, 17] рассмотрены вопросы использования классической теории перколяции для прикладных сетевых исследований. Однако они не рассматривают методы исследования больших сетей, базирующиеся на теории программируемой перколяции, развиваемые авторами [5, 6, 7, 8].

В обычной постановке задачи теория перколяции рассматривает решетку из узлов и связей или квадратную матрицу с числом строк L , случайная часть ячеек которой – «черная», проводящая поток жидкости или газа, транспортный поток или информационный поток, а остальные ячейки – «белые», не проводящие поток. При росте концентрации (вероятности появления) черных ячеек некоторые из них случайным образом начинают соприкасаться ребрами и сливаться. Соприкасающиеся ребрами «черные» ячейки образуют случайные проводящие кластеры, которые образуются и растут вместе с ростом концентрации «черных» ячеек [1, 2].

Классическая теория перколяции рассматривает матрицу со случайным заполнением, как модель операционной среды в прямой геометрической интерпретации [1, 3, 4, 9, 15, 16]. Данный подход на прямую не подходит для анализа безопасности больших сетей – структура связей между узлами внутри сетевой топологии неоднородна и часто не определена, защищенные связи между узлами имеются, но они не покрывают большинство возможных маршрутов. Необходим переход от топологии сети к «матрице наличия защищенных связей» узлов (МНЗС). Данная МНЗС может позволить исследовать безопасность сетей и наличия сквозных путей на неё методами теории перколяции.

2. Постановка задачи, метод исследования и проведение вычислительного эксперимента

Рассматривается большая сеть. Пути между некоторыми узлами сети защищены. Для того чтобы построить в ней сразу все возможные защищенные маршруты ресурсов не хватает. Можно каждый раз, когда в этом возникает необходимость прокладывать свой защищённый маршрут. Но это займет много времени и ресурсов и поэтому такие маршруты «дороги» по сравнению с маршрутами, проходящими через уже имеющиеся защищённые пути (или через кластеры таких защищённых путей) при условии определённой их концентрации. В этом случае для образования требуемого маршрута придётся дополнительно вводить какое-то относительно небольшое количество защищенных путей, закрывающих «межкластерные дыры».

Имеющаяся неопределённость в обеспечении конкретного защищённого маршрута может быть разрешена статистическим исследованием на большом количестве случайных маршрутов.

Таким образом, рассматривается большая сеть, в которой какая-то случайная часть защищенных связей между узлами образует стохастическую «защищённую основу». На базе этой основы возможна прокладка полностью защищенного маршрута между любыми узлами сети путем введения дополнительно защищенных путей на тех участках сети, где их нет и где это требуется. Эти дополнительные защищенные пути прокладываются в экстренном режиме, требуют определённого их местоположения и поэтому дороже, чем защищенные пути в стохастической основе.

Требуется определить вероятность наличия защищенной связи в стохастической основе (в терминологии теории перколяции – концентрацию «черных»), которая минимизирует общие расходы на создание защищенных маршрутов в сети.

В классической теории перколяции [1, 2, 12, 15, 16] ищется концентрация «черных» ячеек K_p – порог стохастической перколяции, при которой образуется сквозной случайный маршрут по «черным» ячейкам через всю матрицу в заданном направлении – стохастический перколяционный кластер. Однако стохастический перколяционный кластер имеет рыхлую структуру, множество мертвых ветвей и явно избыточен с точки зрения решения практических задач.

При реализации программируемой перколяции [5, 6, 7, 8] на первой фазе создается основа из распределенных случайным образом защищенных путей, образующих кластеры защищенных путей, при значениях их концентрации гораздо ниже порога стохастической перколяции. На второй фазе строится сквозной перколяционный маршрут за счет внедрения (установки) дополнительных защищенных путей в имеющиеся межкластерные интервалы. При этом концентрация стохастической основы выбирается таким образом, чтобы суммарные затраты на двухфазную операцию были минимальны. В результате решения этой задачи концентрация объектов (защищенных путей) при программируемой перколяции становится более чем в два раза меньше порога стохастической перколяции и находится в окрестности концентрации, характерной для среднего максимального числа образующихся кластеров ($K = 0.25$).

Поскольку объекты исследования – большие сети и статистические феномены кластеров защищённых путей, существующие в них, а целью исследования является стратегическое оптимальное по затратам планирование безопасных маршрутов в больших сетях, то теоретические соображения были подтверждены вычислительным экспериментом, как единственным возможным методом экспериментального исследования в этих условиях.

Вычислительный эксперимент для стратегического планирования безопасных маршрутов в больших сетях состоял из ряда последовательных этапов, повторяющихся для каждой из матриц со случайным заполнением (МНЗС), как моделей операционной среды.

Для каждого значения концентрации защищённых маршрутов в МНЗС проводилось следующее:

- заполнение матрицы объектами случайным образом в соответствии с заданным законом распределения вероятностей и значением концентрации;
- выделение и анализ образующихся кластеров объектов;
- вычисление по выделенным кластерам характеристик распределения (средних значений, дисперсий и т.п.) их размеров, межкластерных интервалов и т.п.;
- анализ интервалов между стохастически образованными кластерами и прокладка кратчайших путей искусственной перколяции с определением среднего значения длины этого пути и среднего количества дополнительных защищенных путей в межкластерных интервалах по совокупности матриц со случайным заполнением.

Для целей выделения кластеров и подсчета их характеристик был использован алгоритм Хошена-Копельмана [11, 13]. Для целей прокладки пути через образовавшиеся кластеры был разработан алгоритм «Молния-точка», являющийся модификацией алгоритма «Молния» и Дейкстры [5, 6, 7, 8].

3. Свойства МНЗС

Классическая теория перколяции рассматривает матрицу со случайным заполнением, как модель операционной среды в прямой геометрической интерпретации. Данный подход не подходит для анализа безопасности сетей, где топология сетей не отображается на плоскую матрицу. Необходим переход от топологии сети к «матрице наличия защищенных связей» узлов (МНЗС). Данная МНЗС может позволить исследовать безопасность сетей и наличия сквозных путей на ней методами теории перколяции.

Пример подобного перехода представлен ниже на рисунках 1 и 2.

На рисунке сети черными линиями показаны информационные связи (пути) между узлами-участниками сети, желтые – это защищенные соединения (защищенные пути) между узлами.

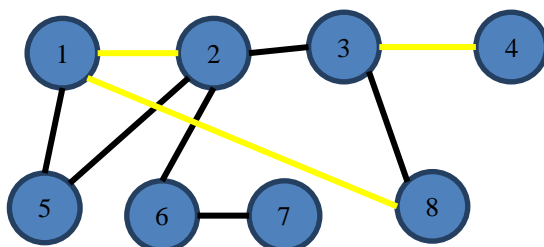


Рис. 1. Случайный сетевой граф.

	1	3	6
2			
8			
5			
7			
4			

Рис. 2. МНЗС только для безопасных участков сети, представленной на рисунке 1.

Заполнение МНЗС происходит по следующему правилу: имена конечных узлов путей, которые нас интересуют, откладываем по вертикали; имена начальных узлов путей в сети, которые нас интересуют, откладываем по горизонтали (на рисунке 2 они отмечены голубым цветом). **Важно, чтобы узлы по вертикали и горизонтали МНЗС**

не повторялись. Для предлагаемого метода исследования не очень важна строгая квадратность МНЗС. Возможно случайное перемешивание как строк, так и столбцов. Алгоритм заполнения МНЗС следующий:

1. Повторять, пока не закончатся узлы:
 - 1.1. Если узел *A* отсутствует в таблице, то по горизонтали записывают имя узла.
 - 1.2. По вертикали записывают те узлы, с которыми в сети есть связь с узлом *A*.
 - 1.3. В соответствующие ячейки МНЗС проставляют наличие защищенной связи (ячейка делается черной) между узлом *A* и остальными узлами таблицы.
2. Конец цикла.

Соседние «черные» ячейки образуют кластер, смысл которого – это возможность передачи защищенной информации по этому участку сети. В данном примере (см. рис. 2) есть два кластера: кластер «1-2, 1-8» и кластер «3-4».

Если добавить в МНЗС в определённые «межкластерные дыры» защищённые связи (добавленные связи обозначим красным цветом), то в МНЗС образуется сквозной не стохастический, а программируемый перколяционный маршрут, который означает, что все узлы, расположенные по вертикали, доступны для защищенной связи с узлами из горизонтали.

Таким образом, создание защищенной связи между всеми узлами, отложенными по вертикали отображается на МНЗС в виде программируемого перколяционного вертикального маршрута (см. рис. 3):

	1	3	6
2			
8			
5			
7			
4			

Рис. 3. Программируемая перколяция в МНЗС.

Очевидно, что этих защищенных путей может быть много. Они могут проходить через один любой узел, размещенный на горизонтали, а также через несколько таких узлов, размещённых на горизонтальной оси. Могут быть и любые другие перколяционные маршруты, получаемые, например, при направленной перколяции. Можно построить алгоритм прокладки наикратчайшего маршрута в заданном направлении: для этого нами использовалась модификация алгоритма Дейкстры. Все программируемые перколяционные маршруты рассматриваются при статистическом моделировании.

Статистическое исследование проведено нами на МНЗС различных размеров, заполненных с помощью генератора случайных чисел.

Пример одной из МНЗС со случайным заполнением защищенными путями («черными» ячейками) для различной концентрации «черных» ячеек приведен на рисунке 4. Размер МНЗС на данном рисунке равен 50 × 50. На рисунках красным отмечены возможные кратчайшие маршруты программируемой перколяции для МНЗС в направлении снизу-вверх. Обращает на себя внимание гораздо большая извилистость маршрута программируемой перколяции для матрицы с концентрацией $K = 0.6$.



Рис. 4. Примеры перколяционных маршрутов для матриц с концентрацией заполнения а) $K = 0.25$, б) $K = 0.6$.

4. Некоторые статистические особенности образования кластеров в больших сетях

Концентрация K – относительная доля «черных» узлов при случайно-однородном заполнении матрицы является вероятностью появления «черной» ячейки [2] при равномерном распределении вероятности их появления по матрице. Поэтому здесь и далее наряду с выражением «вероятность наличия заданного объекта в ячейке матрицы (защищенного пути)» употребляется более краткое выражение «концентрация».

Статистическое моделирование на таких квадратных матрицах со случайным заполнением позволяет обнаружить и исследовать несколько статистических феноменов (особенностей) образующихся кластеров, имеющих большое практическое значение.

Первая особенность – наличие порога стохастической перколяции, как «пробоя» матрицы проводящим перколяционным кластером, гарантировано наступает при $K = 0.6$.

Вторая особенность – наличие значения концентрации объектов, при котором среднее число образовавшихся кластеров имеет максимум [5, 6, 7, 8, 18]. Там же показано, что это значение робастно – имеет малую чувствительность к закону распределения вероятности нахождения объекта в ячейке матрицы. Эта особенность выполнима при $K = 0.25$ (см. рис. 5).

Третья статистическая особенность – наличие максимума средней длины кратчайшего маршрута через стохастически образованные кластеры в направлении перколяции, возникающего при росте концентрации объектов и связанного с ростом «извилистости» этого маршрута. Средняя длина кратчайшего маршрута программируемой перколяции $L(K)$ растет вплоть до порога стохастической перколяции, после чего начинает уменьшаться. Чем больше извилистость перколяционного маршрута (т.е. чем больше его длина), тем из большего количества «попутных» кластеров он состоит.

5. Исследование двухфазных операций

Нами в процессе статистического моделирования рассматривалось несколько тысяч матриц различных размеров, ячейки которых заполнялись случайным образом с учётом равновероятностного распределения объектов по ячейкам. По полученным случайным матрицам были распознаны алгоритмом Хошена-Коппельмана [5, 6, 7, 13] все кластеры, определены их статистические характеристики и построены графики для их средних значений.

Зависимость среднего количества образовавшихся кластеров на матрице от вероятности наличия объекта в ячейке K отражена на рисунке 5. По мере увеличения этой вероятности до значения ~ 0.25 матрица заполняется объектами и количество кластеров растёт. При дальнейшем увеличении концентрации кластеры начинают сливаться, их среднее количество падает, а размеры растут.

Физические соображения подсказывают, что количество кластеров, образовавшихся на матрице при определенной концентрации, зависит от площади матрицы L^2 . Длины путей на матрице зависят от линейного размера матрицы L . Таким образом, от влияния размеров матрицы на численные результаты статистического моделирования можно избавиться, если результаты нормировать путем их деления соответственно на L или L^2 , что и подтверждается численными расчетами (см. рис. 5).

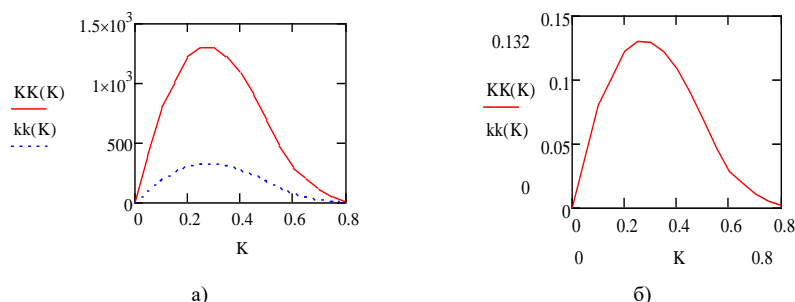


Рис. 5. Зависимость среднего количества кластеров от вероятности наличия объекта в ячейке для матрицы 50x50(обозначена пунктиром) и 100x100 – а) и нормированное по площади матрицы среднее число кластеров – б) для обоих случаев.

Снижения потребной концентрации объектов и, следовательно, необходимого их количества для реализации перколяции можно достичь, если использовать вместо классической стохастической перколяции предложенную программируемую перколяцию с применением оптимальной двухфазной операции.

Учитывая различную стоимость «объектов первого рода», распределенных случайным образом и образующих стохастическую основу («черные» ячейки), и «объектов второго рода», внедряемых в определенные места зоны обслуживания для достижения программируемой перколяции с минимальной длиной пути («красные» ячейки), можно найти концентрацию объектов стохастической основы, при которой общие расходы на создание пути программируемой перколяции будут иметь минимум.

При этом можно полагать, что во всех приложениях данной теории каждый из объектов стохастической основы, разбросанных случайно по операционной среде, дешевле внедряемого (устанавливаемого) в определенное место операционной среды дополнительного объекта.

На рисунке 6 приведены обработанные результаты моделирования двухфазных операций: среднее число добавленных объектов для получения программируемой перколяции при различных значениях концентрации объектов стохастической основы и для матриц различных размеров. На рисунке 6а) по вертикали отложено среднее число добавленных объектов для матриц размером 50x50 (обозначено пунктиром) и 100x100. На рисунке 6б) данные зависимости нормированы по размеру матрицы (после чего графики совпали).

При значении концентрации $K = 0.6$ образуется стохастический перколяционный кластер, и кратчайший перколяционный маршрут проходит по нему. Поэтому среднее число добавленных ячеек в этом случае стремится к нулю. Извилистость и длина маршрута перколяции для этой концентрации максимальны. При дальнейшем росте концентрации кратчайший маршрут перколяции «спрямляется» и длина его падает (рис. 6в) [8].

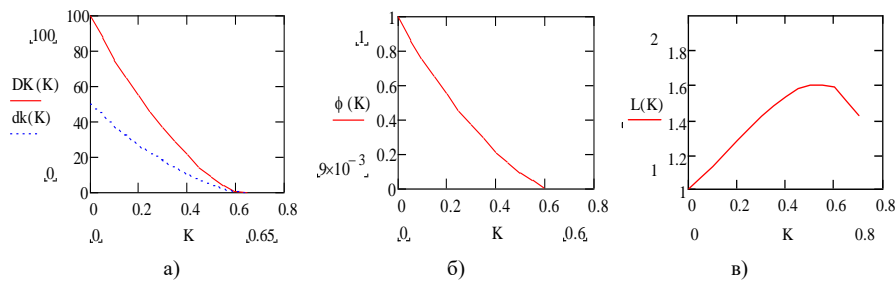


Рис. 6. Зависимость среднего числа добавленных объектов $\varphi(K)$ и средней нормированной длины пути программируемой перколяции $L(K)$ от вероятности наличия объекта в ячейке K .

Проведем теперь расчеты затрат на двухфазную операцию. Обозначим стоимость определения (подготовки) каждого из распределенных случайным образом защищенных путей α , а стоимость одного дополнительного защищенного пути, выбираемого (подготавливаемого) в определенном месте большой сети на второй фазе, $\theta(K)$.

Тогда суммарная стоимость двухфазной операции P будет:

$$P = \alpha * K * L^2 + \theta(K) * \varphi(K) * L \quad (1)$$

Здесь первое слагаемое – стоимость подготовки стохастической основы операционной среды, а $K * L^2$ – количество базовых защищенных путей в стохастической основе, как функция концентрации. Второе слагаемое в (1) – стоимость защищенных путей для формирования кратчайшего программируемого перколяционного маршрута через стохастически образованные кластеры. $\varphi(K) * L$ – среднее количество добавленных защищенных путей в МНЗС размером L , определенных по результатам статистического моделирования, и приведенных в нормированной зависимости (см. рис. 6в).

Функция $\theta(K)$ отражает зависимость стоимости создания и установки каждого внедряемого в большую сеть защищенного пути от концентрации стохастической основы.

Будем полагать, что стоимость создания каждого из дополнительных защищенных путей в определенной ячейке матрицы МНЗС пропорциональна размеру и количеству закрываемых на перколяционном маршруте «межкластерных дырок». Иными словами пропорциональна относительному числу «красных» маршрута $\varphi(K) * L / L(K) * L$ и обратно пропорциональна относительной извилистости маршрута $L(K) / L$, т.к. максимальной

извилистости соответствует отсутствие «дырок», которые надо закрывать (отсутствие «красных»). Таким образом, большое количество «дырок» в маршруте – большая стоимость, приходящая на каждый дополнительно защищаемый путь, $\theta(K) = \theta_0 * \varphi(K) * L / L(K)^2$. С учетом этого выражения уравнение суммарных затрат (1) примет вид:

$$P = \alpha * K * L^2 + \theta_0 * \varphi(K)^2 * L^2 / L(K)^2 \quad (2)$$

Рассмотрим относительную стоимость двухфазной операции, для чего разделим левую и правую часть полученного уравнения (2) на $P_{\text{п}} = \alpha * K_{\text{п}} * L^2$ – стоимость чисто стохастической однофазной операции.

Тогда:

$$P_{\text{отн}} = P / P_{\text{п}} = 1.7K + 1.7 * \left(\frac{(\theta_0 * \varphi(K)^2)}{(\alpha * L(K))} \right) = 1.7 \left(K + R * \varphi(K)^2 / L(K)^2 \right), \quad (3)$$

где $R = \theta_0 / \alpha$ обозначим отношение стоимости дополняющего объекта к стоимости объекта стохастической основы. Полученная по данному выражению с учетом зависимостей $\varphi(K)$ и $L(K)$ от K (см. рис. 5) зависимость относительной стоимости двухфазной операции от концентрации стохастической основы K приведена на рисунке 7 для $R = 1$.

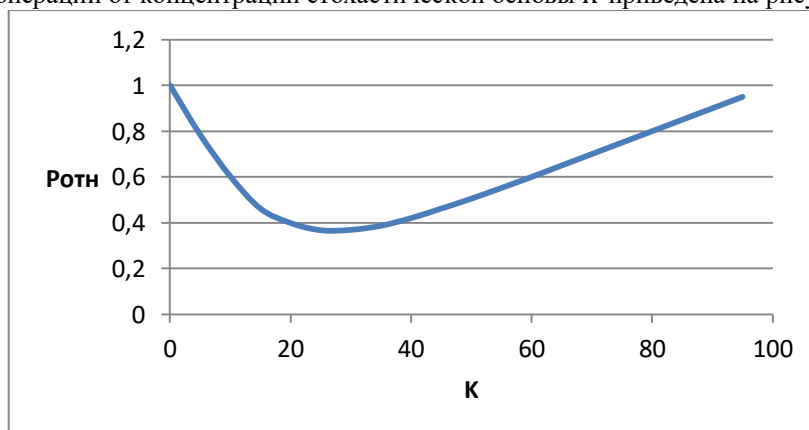


Рис. 7. Зависимости относительных затрат на проведение двухфазной операции от концентрации объектов стохастической основы.

Анализ графика на рисунке 7 показывает, что при реализации двухфазных операций оптимальное значение вероятности наличия защищенного пути «в ячейке стохастической основы» с точки зрения минимизации общих затрат составляет ~ 0.25 , что соответствует максимальному числу кластеров стохастической основы (см. рис. 5). В использованных для построения графика (см. рис. 7) выражениях нигде в явном виде не присутствует эта замечательная точка. Этот хорошо физически интерпретируемый результат можно трактовать как подтверждение правильности данных статистического моделирования и модели трудоемкости двухфазной операции.

6. Исследование устойчивости перколяционного маршрута

В сложных технических системах ситуация, когда все работает так, как задумано, является крайне редкой. Но благодаря продуманной политике безопасности, предусматривающей необходимость работы в условиях нештатных ситуаций, и наличию резервов все должно заканчиваться благополучно и при наличии отказов и ошибок.

Поэтому модель безопасности для больших сетей должна включать в себя обеспечение продолжения безопасного функционирования при отказах отдельных узлов сети. Метод статистических исследований на МНЗС, предложенный в настоящей статье, позволяет наглядно рассмотреть этот вопрос.

Были проведены исследования отказов защищённых связей на перколяционном маршруте. Здесь отказ – это уничтожение защиты в ячейке МНЗС, который приводит к прерыванию протекания защищенной информации по выбранному маршруту. Будем полагать, что точку отказа невозможно быстро восстановить, её можно только обойти. Возникает вопрос: что стоит такой обход, насколько увеличится длина проложенного маршрута? Очевидно, что ответ на этот вопрос зависит от топологии большой сети, а в рамках нашей перколяционной модели – от концентрации «черных».

Для получения ответа на данные вопросы было проведено статистическое моделирование. Компьютерный эксперимент проводился следующим образом: сначала на перколяционном маршруте случайным образом выбиралась ячейка, прохождение маршрута через которую запрещалось. Из предыдущей от нее точки пускался новый перколяционный маршрут, на тех же условиях направления и оптимальности, который шел в обход образовавшегося «отказа». Вероятность того, что новый перколяционный маршрут вернется на прежний, представлена на рисунке 8 для определённой ранее оптимальной концентрации стохастической основы $K = 0.25$. Полученный в ходе эксперимента график не зависит от размера матрицы. Нормирование графика проводилось по следующему правилу: $L_n = i/L$, где i – это координата пробоя по вертикали МНЗС, L – высота матрицы МНЗС.

Можно сказать, что маршрут до значения $L_n = 0.85$ является устойчивым, т.е. с большой вероятностью новый перколяционный маршрут вернется на старый. Все «всплески» на графике лежат в рамках статистической погрешности.

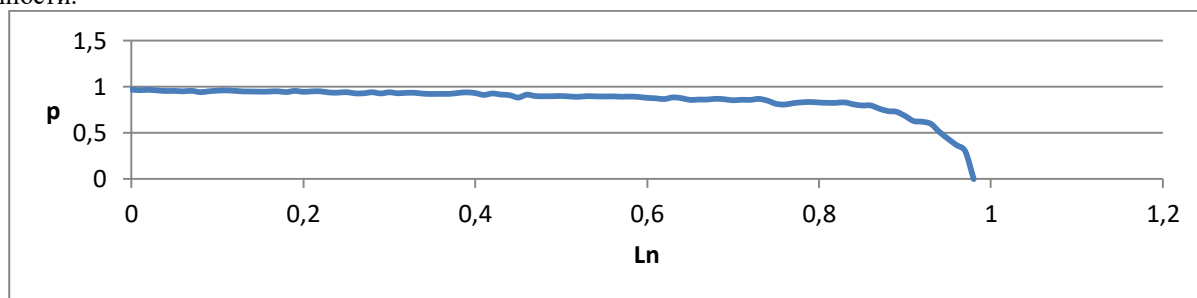


Рис. 8. График вероятности того, что новый путь вернется на старый от координаты пробоя.

В ходе данного статистического исследования были получены зависимости количества «зеленых» ячеек от концентрации для матриц разных размеров L . Здесь и далее «зеленые» ячейки – это новые добавленные ячейки в перколяционный маршрут с целью обхода «запрещенной ячейки» – отказа.

Зависимости количества «зеленых» ячеек L_G от концентрации приведены на рисунке 9. Для матриц разных размеров этот график фактически совпадает.

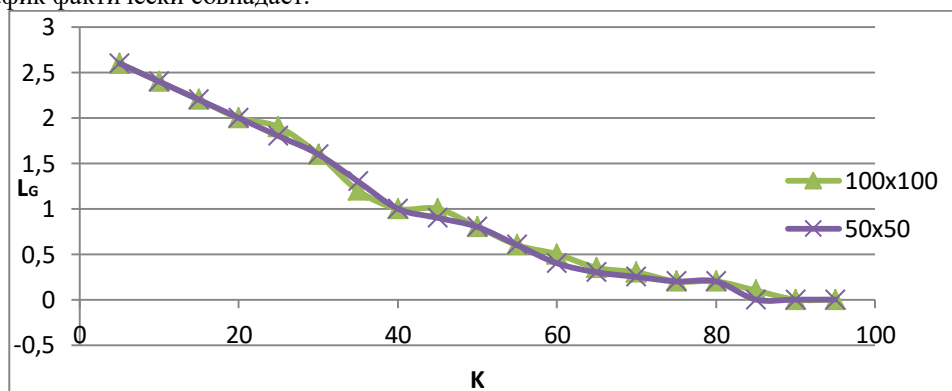


Рис. 9. График зависимости количества «зеленых» добавленных в обходной маршрут ячеек от концентрации для матриц разных размеров.

Стоит заметить, что все отклонения на графике находятся в рамках статистической погрешности.

Из результатов данного исследования можно сделать вывод, что количество «зеленых» ячеек не зависит от размера матрицы и зависит только от концентрации. Следовательно, явление «отказа» носит сугубо локальный характер.

7. Исследование направленной перколяции на МНЗС

Также проведено исследование по направленной перколяции (от одной заданной точки до другой). Подобная задача может быть актуальна для информационных сетей вне рамок статистических исследований, например, когда необходимо установить защищенную связь строго между конкретными узлами сети.

Зафиксируем в любом месте первой строки и в любом месте последней строки матрицы точки А и В соответственно. Перколяционный маршрут, проложенный для таких точек А и В, проходит под некоторым углом, далее называемым нами «углом поворота», к вертикали матрицы. Т.е. этот путь держится вдоль некоторой геометрической оси между точками А и В. Чтобы избавиться от зависимости от размера матрицы, необходимо провести нормирование по длине направляющей оси. Простые соображения подсказывают, как это сделать:

$$\varphi_T = \frac{L_R}{l}; l = \sqrt{(i_B - i_A)^2 + (j_B - j_A)^2}, \quad (4)$$

где L_R – количество «красных» добавленных ячеек на перколяционном маршруте, l – геометрическое расстояние между точками А и В, вычисляемое по векторной теореме Пифагора, где $(i_A; j_A)$ и $(i_B; j_B)$ – координаты точек А и В соответственно.

Проведя подобные исследования для разных углов поворота, было установлено, что значение φ_T не зависит от угла поворота. Далее была построена зависимость φ_T от концентрации по следующему правилу: брались такие точки А и В, которые лежали внутри кластеров. Полученный результат (см. рис. 10, график «б») был сравнен с графиком на рисунке 6б (см. рис. 10, график «а»). Результаты совпали, следовательно, среднее количество добавленных в перколяционный маршрут объектов («красных») будет одинаковым независимо от направления перколяционного маршрута.

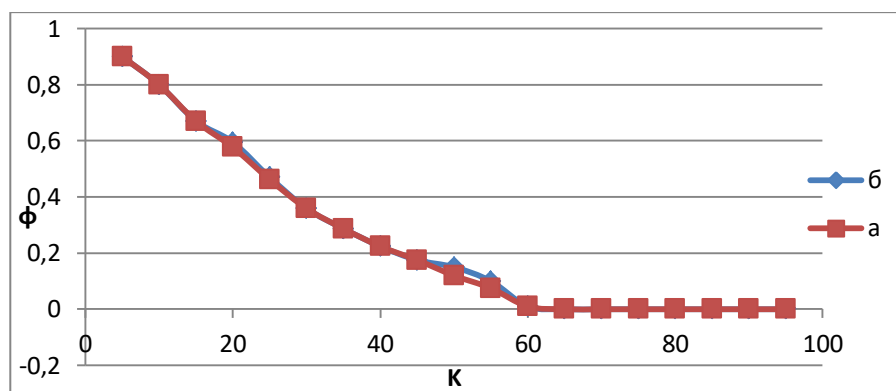


Рис. 10. а – зависимость среднего числа добавленных объектов $\varphi(K)$ и средней нормированной длины пути программируемой перколяции от концентрации (рис. 9); б – Зависимость нормированной длины пути направленной перколяции от концентрации.

Заметим, что график 10а – это график, полученный при усреднении количества «красных» при перколяционном пробое, а график 10б – усреднение количества «красных» при направленной перколяции для строго фиксированных точек А и В.

8. Заключение

1. При наличии ограничений на ресурсы оптимальное по затратам планирование защищенных маршрутов должно проходить две фазы: на первой фазе создаётся стохастическая основа защищенных путей при сравнительно низкой их концентрации, на второй прокладываются конкретные защищенные маршруты через кластеры стохастической основы с добавлением минимального числа защищенных путей в интервалы между кластерами стохастической основы.

2. Концентрация защищённых связей в стохастической основе должна быть 0.25. При этой концентрации защищенных узлов число образовавшихся кластеров максимально. В этом случае возможно с минимальными суммарными средними затратами построить любой конкретный защищённый путь между заданными узлами сети.

3. Проведено исследование устойчивости программируемых перколяционных маршрутов к отказам отдельных защищенных путей. По результатам исследования установлено, что явление отказа носит локальный характер и что обходные маршруты с большой вероятностью возвращаются на прежний перколяционный маршрут.

4. При выбранной оптимальной концентрации защищённых связей 0.25 среднее число дополнительно вводимых защищённых связей для обхода любой отказавшей не превышает 2.

Литература

[1] Москалев, П.В. Математическое моделирование пористых структур./ П.В. Москалев, В.В. Шитов, – Москва: Физматлит, 2007. – 120с.
 [2] Тарасевич, Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. / Ю.Ю. Тарасевич, – Москва: УРСС, 2002. – 109с.
 [3] Голубев, А.С., Звягин, М.Ю., Милованов, Д.С. Эффект перколяции в информационных сетях с неустойчивыми связями / А.С. Голубев, М.Ю. Звягин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. –2011. –Т.2, №3. –С. 260-263.

- [4] Некрасова, А.А., Соколов, С.С., Исследование возможности применения теории перколяции для управления потоками данных в информационных сетях на транспорте/ А.А. Некрасова, С.С. Соколов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. –2010. –Т.32, №4. –С. 192-198.
- [5] Мостовой, Я.А., Статистические феномены больших распределенных кластеров наноспутников/ Я.А. Мостовой // Вестник Самарского Государственного Университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета) –2011. –Т.26, № 2. –С. 80-89.
- [6] Мостовой, Я.А., Двухфазные операции в больших сетях наноспутников/ Я.А. Мостовой // Компьютерная оптика. –2013. –Т. 37, № 1 –С. 120-130.
- [7] Мостовой, Я.А., Управляемая перколяция и оптимальные двухфазовые операции в больших сетях наноспутников/ Я.А. Мостовой // Инфокоммуникационные технологии. –2013. –Т. 11, №1. –С. 53-62.
- [8] Мостовой, Я.А., Моделирование оптимальных двухфазных операций в случайных операционных средах/ Я.А. Мостовой // Автотметрия. –2015. –Т. 51, №3. –С. 35-41.
- [9] Alexandrowicz, Z. Critically branched chains and percolation clusters // *Physics Letters A*. – 1980. – Vol. 80, no. 4. – P. 284-286.
- [10] Agrawal, P., Redner, S., Reynolds, P. J., Stanley, H. E. Site-bond percolation: a low-density series study of the uncorrelated limit. // *J. Phys. A: Math. Gen.* 12, 2073-2085 (1979).
- [11] Babalievski, F. Cluster counting: the Hoshen-Kopelman algorithm vs. Spanning tree approach. // *International Journal of Modern Physics C*. 9(1), 43-61 (1998).
- [12] Galam, S., Mauger, A. Universal formulas for percolation thresholds. // *Phys. Rev. E*, 53(3), 2177-2181 (1996).
- [13] Hoshen, J., Kopelman, R. // *Phys. Rev. B*. 1976. Vol. 14. P. 3438–3445
- [14] Sarshar, N Scalable Percolation Search in Power Law Networks / N. Sarshar, P.O. Boykin, V.P. Roychowdhury // *Proceedings of the Fourth International Conference on Peer-to-Peer Computing*. – Zurich, Швейцария, 2004.
- [15] Stauffer, D. Scaling theory of percolation clusters. // *Physics Reports* 54, 1-74 (1979).
- [16] Stauffer, D., Aharony, A. *Introduction to Percolation Theory*. — London: Taylor & Francis, 1992.
- [17] Vakulya, G. Energy Efficient Percolation-Driven Flood Routing for Large-Scale Sensor Networks / G. Vakulya, G. Simon // *Proceedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology*. – Wisla, Польша, 2008. – С. 877 – 883. – ISBN 978-83-60810-14-9.
- [18] Wilkinson, D., Willemsen, J. F. Invasion percolation: A new form of percolation theory. *J. Phys.* A16, 3365-3376 (1983).